

艾比湖湿地不同盐渍化土壤粒度组成及可蚀性研究^①

王敬哲^{1,2}, 丁建丽^{1,2*}, 王 飞^{1,2}, 梁 静^{1,2}

(1 新疆大学资源与环境科学学院智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室, 乌鲁木齐 830046;

2 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要:为了研究内陆干旱区不同盐渍化土壤的粒径组成及其可蚀性的空间分布, 在不同盐渍化程度上探讨其与土壤中盐分含量的相互关系, 本研究以新疆维吾尔自治区艾比湖湿地为研究靶区, 利用2015年5月获取的66个表层土壤样品, 对土壤的粒度组成、含盐量、分形维数和可蚀性因子 K 值进行了研究。结果表明: 样品中盐土占比达到59.09%, 平均含盐量达131.59 g/kg, 研究区内盐渍化现象既普遍又严重; 土壤颗粒以粉粒和砂粒为主, 随着盐渍化程度的加剧黏粒含量不断增加, 砂粒含量则相反; 土壤颗粒的分形维数 D 值介于2.14~2.60, 平均值为2.45; 随着盐渍化程度加剧, 分形维数逐渐变大, K 值也随之逐渐增大, 盐土的 K 值最大达0.093; 土壤可蚀性因子 K 值与含盐量的相关性较高($r=0.596^{**}$), 在一定程度上可以说明, 土壤的含盐量水平越高, K 值越大, 越容易被侵蚀。

关键词:盐渍土; 内陆干旱区; 分形维数; 粒径; 艾比湖湿地

中图分类号: S152.3; S151.9 文献标识码: A

土壤是由不同颗粒大小的固相物质及孔隙组成的分散多孔介质, 具有一定的分形特征^[1-3]。土壤分形维数不仅可以反映土壤的粒径分布(soil particle size distribution, PSD)状况, 表征不同粗细土壤颗粒的分布情况, 同时与土壤的肥力状况、水力学性质、固碳能力以及抗蚀特性等密切相关^[4-7]。其对植被生长、水土保持以及生态修复有着极为重要的研究意义^[8]。土壤可蚀性指土壤是否易受侵蚀动力破坏的能力, 也就是土壤对外界侵蚀、剥蚀和搬运的敏感程度。土壤粒径分布、分形特征以及可蚀性等研究受到广大研究人员的关注并日渐成为土壤学领域的研究热点。

近几十年来, 国内外学者主要针对土壤侵蚀、土壤退化以及持水特性等领域对土壤粒径进行了大量研究^[9-12]。Arya和Paris^[13]通过细化土壤粒径分布曲线并结合土壤粒度参数建立了对应的土壤水分特性模型。Gui等^[14]以策勒绿洲为研究区, 利用表层土壤的粒径分布状况分析了人为及自然因素对其的影响。Chen和Zhou^[15]研究了重庆万州紫土区的土壤粒径分布状况并利用通用土壤流失方程(universal soil loss equation, USLE)对小流域的土壤侵蚀量进行了预测。赵明月等^[16]分析了黄土丘陵沟壑区不同

尺度的土壤粒径, 探讨了粒径分布特征与外界环境因子的关系。茹豪等^[17]就不同土地利用类型对土壤粒径分布的影响及其与分形参数之间的关系开展了研究。朱成刚等^[18]探讨了伊犁河谷土壤的可蚀性特征及其与土壤特征因子的相关性。这些研究主要针对不同的母质组成、地貌类型、植被群落特征等开展, 而对于荒漠区不同盐渍化程度土壤的粒级状况及相关研究相对较少。

艾比湖是新疆面积最大的咸水湖, 自20世纪50年代伊始湖泊逐渐萎缩, 近年来湖泊面积已不足400 km², 而且退化程度愈发严重^[19]。此外, 受强烈的蒸发作用影响, 湖周湿地土壤荒漠化与盐渍化现象十分严重, 对天山北坡经济带的可持续发展产生了直接影响, 并且威胁到新亚欧大陆桥的安全运行^[20]。基于此, 本研究以内陆干旱区艾比湖湿地自然保护区的表层土壤为研究对象, 依据原位工作以及室内分析实验, 研究不同盐渍化程度土壤的粒径分布及其可蚀性的空间分布, 从不同盐渍化程度上探讨其与土壤中盐分含量的相互关系, 以期为干旱区湿地土壤的水土保持功能及生态修复提供科学支持和参考。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41771470、41661046)资助。

* 通讯作者(watarid@xju.edu.cn)

作者简介: 王敬哲(1992—), 男, 河南郑州人, 博士研究生, 研究方向为陆地遥感与全球变化。E-mail: wjzf-682@163.com

1 材料与方法

1.1 研究区概况

艾比湖湿地是内陆干旱区典型的高盐湖泊湿地，地处新疆维吾尔自治区西北部，准噶尔盆地西南缘，地理坐标为 $44^{\circ}30' \sim 45^{\circ}10' N$, $82^{\circ}35' \sim 83^{\circ}50' E$ 。艾比湖湿地国家级自然保护区于 2008 年成立，保护区总面积达 $2\,670.85\text{ km}^2$ ，地跨博尔塔拉蒙古自治州境内的博乐市、精河县及阿拉山口市^[21-22]。研究区南、北、西三面环山，远离海洋并受西北部阿拉山口影响，

多年平均大风($>17\text{ m/s}$)天数可达 164 d。该区域年平均气温 7.4°C ，年平均降水量不足 100 mm，且年内分布极不均匀；年均潜在蒸发量高达 $1\,315\text{ mm}$ ，属典型温带大陆性干旱气候^[23-25]。土壤成土母质主要有湖积、洪积冲积、风积物等几类。艾比湖湿地典型的地带性土壤类型为灰漠土、灰棕漠土及风沙土等，土壤的盐化及石质性程度均较为强烈^[26]。土地利用方式以灌木林地、荒草地为主，农地面积占比不足 0.01%，且分布零散。受自然和人为因素影响，艾比湖湿地土壤的荒漠化和盐渍化现象十分普遍，生态环境极为脆弱。

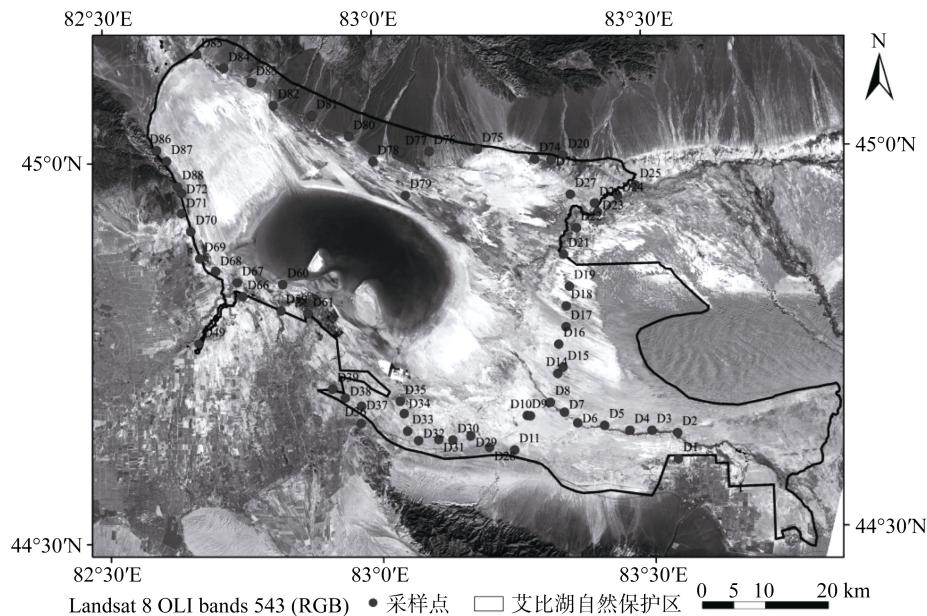


图 1 研究区示意图及采样点分布
Fig.1 Location of study area and distribution of sampling sites

1.2 样品采集及处理

土壤样品的采样时间为 2015 年 5 月中旬，根据艾比湖湿地的生态景观特征，选取有代表性的绿洲、荒漠及交错带等景观布设 66 个样地，样地尺寸 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 。采集样品前，利用 GPS 记录该样地的位置，采用 5 点混合法进行土样采集，采样深度为 $0 \sim 10\text{ cm}$ ，共计 66 个土壤样品。待土壤样品自然风干后去除草根等杂质并过 2 mm (10 目)孔筛后分为 3 份，分别用于土壤含盐量、有机碳含量以及粒径的测定。其中，土壤含盐量使用德国 Wissenschaftlich Technische Werkstätten 公司生产的 Multi 3420 SET B 便携式多参数分析仪，在土壤悬浊液(水土比 5:1)中进行测定；土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)含量的测定采取重铬酸钾容量-稀释热法^[27]；土样经过去除有机碳、碳酸钙和颗粒分散等预处理后，使用美国 Microtrac 公司生产的 S3500 型激光粒度仪(量程

$0.01 \sim 2\,000\text{ }\mu\text{m}$)测定土壤粒径的体积分数，每个供试土样重复测定 5 次，取算术平均值，重复测量误差小于 2%。土壤 PSD 分级依据国际制土壤质地分级标准，即黏粒(粒径 $<0.002\text{ mm}$)、粉粒(粒径 $0.002 \sim 0.02\text{ mm}$)和砂粒(粒径 $0.02 \sim 2\text{ mm}$)。

1.3 土壤粒径分形维数计算

土壤粒径的分形维数可以准确表征土壤颗粒的分布特征及质地均匀程度^[3, 28]。因此，本研究采用土壤颗粒体积分形模型计算研究区表层土壤的单重分形维数。其公式为：

$$3 - D = \frac{\lg(V_{(r < R_i)} / V_T)}{\lg(R_i / R_{\max})} \quad (1)$$

式中： D 为分形维数， r 为土壤粒径， $V_{(r < R_i)}$ 为小于某一粒径 R_i 的累计体积； V_T 指土壤颗粒的总体积； R_{\max} 指的是对所有粒级而言的上限值，数值上即为最大粒径。计算时先计算 $\lg(V_{(r < R_i)} / V_T)$ 与 $\lg(R_i / R_{\max})$ 的最小

二乘拟合直线的斜率, 该数值等于 $3-D$, 进而求出分形维数 D 值。

1.4 土壤可蚀性 K 值计算

土壤可蚀性因子 K 值采用 Williams 等^[29]在 Erosion - Productivity Impact Calculator(EPIC)模型中发展的估算方法, 该方法仅需土样的有机碳和粒度组成资料即可进行区域土壤可蚀性因子的估算, 计算公式如下:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 \text{Sa} \left(1 - \text{Si}/100 \right) \right] \right. \\ \times \left(\frac{\text{Si}}{\text{Cl} + \text{Si}} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] (2) \\ \left. \times \left[1 - \frac{0.7\text{Sn}}{\text{Sn} + \exp(-5.51 + 22.9\text{Sn})} \right] \right\}$$

式中: Sa 表示土壤中砂粒体积分数(%) , Si 为粉粒体积分数(%) ; Cl 为黏粒体积分数(%) ; C 为有机碳体积分数(%) ; 其中, $\text{Sn}=1 - \text{Sa}/100$ 。 K 值越大则表示越容易受到侵蚀, 反之亦然。

1.5 数据处理

采用统计分析软件 SPSS 19.0 对不同盐渍化程度土壤的粒度组成、分形维数及 K 值进行相关性分析, 并进行空间可视化表达, 采用 Origin9.0 及 ArcGIS 10.1 进行绘图。

2 分析与讨论

2.1 土壤盐渍化分级

根据土壤含盐量的不同, 可将土壤分为非盐渍土、轻度盐渍土、中度盐渍土、重度盐渍土以及盐土 5 类(表 1)。根据各类盐渍化土壤的划分标准, 本研究对 66 个表层土壤样本进行了盐渍化程度的分类统计^[30-31]。从表 1 中可知, 非盐渍土样本 10 个, 占比仅为 15.15%; 轻、中、重度盐渍土样本共计 17 个, 占总样本数的 25.76%; 而占比最多的为盐土, 占比

达到 59.09%, 均值达 131.59 g/kg, 远远大于盐土含盐量的最低标准(20 g/kg)。这说明研究区内, 盐渍化现象十分普遍, 且程度较为严重。

表 1 盐渍化土壤分级标准及土壤样本分类统计
Table 1 Grading standard of salinization and classification statistics of soil samples

盐渍化程度	含盐量(g/kg)	样本数	比例(%)	均值(g/kg)
非盐渍土	<3.0	10	15.15	0.85
轻度盐渍土	3.0~5.0	5	7.58	3.83
中度盐渍土	5.0~10.0	8	12.12	7.50
重度盐渍土	10.0~20.0	4	6.06	17.75
盐土	>20.0	39	59.09	131.59

2.2 土壤粒径分布及分形维数

对不同盐渍化程度土壤的粒径分布及分形特征进行描述性统计, 由表 2 可知, 艾比湖湿地内表层土壤颗粒以粉粒和砂粒为主, 最大体积分数可达 70.76% 和 98.19%, 黏粒体积分数最小为 0。非盐渍土、轻度盐渍土、中度盐渍土、重度盐渍土以及盐土的黏粒体积分数分别为 1.01%、1.45%、1.52%、1.57% 和 1.58%, 就平均值而言, 黏粒体积分数随着盐渍化程度的加剧而不断增加; 而砂粒体积分数在上述 5 种土壤中分别为 81.53%、81.27%、76.82%、73.32% 和 69.89%, 砂粒体积分数与盐渍化程度呈一定的负相关关系。在 5 种不同盐渍化程度的土壤中, 各粒径体积分数的差异性不强, 均属中等变异程度(10% < CV < 100%), 说明随着土壤颗粒的变细, 变异性逐渐增强。

根据粒径分级情况以及公式(1), 对研究区表层土壤粒径的分形维数进行计算, 得到对应的分形维数 D 值(表 2)。研究区非盐渍土、轻度盐渍土、中度盐渍土、重度盐渍土以及盐土 5 类土壤 D 值介于 2.14~2.60, 平均值为 2.45; 随着盐渍化程度的加剧, 对应土壤的 D 值也逐渐增加, 总体趋势是: 盐渍化程度越强, 土壤的分形维数越大。

表 2 不同盐渍化程度的土壤粒径分布和分形维数
Table 2 PSDs and fractal dimensions of soils under different salinization degrees

盐渍化程度	样本数	粒径	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数(%)
非盐渍土	10	黏粒	0.01	1.91	1.01	0.64	63.37
		粉粒	2.68	35.41	17.46	9.07	51.95
		砂粒	63.02	97.31	81.53	9.46	11.60
		D	2.21	2.52	2.31	0.09	3.90
轻度盐渍土	5	黏粒	0.08	2.73	1.45	1.04	71.72
		粉粒	2.73	32.06	17.28	15.20	87.96
		砂粒	65.21	97.20	81.27	16.39	20.17
		D	2.17	2.52	2.35	0.17	7.23

续表

盐渍化程度	样本数	粒径	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数(%)
中度盐渍土	8	黏粒	0.93	2.44	1.52	0.46	30.26
		粉粒	7.67	42.68	21.66	15.20	70.18
		砂粒	54.87	91.10	76.82	15.57	20.27
		D	2.35	2.54	2.42	0.08	3.31
重度盐渍土	4	黏粒	0.66	2.55	1.57	0.40	25.48
		粉粒	6.37	39.22	25.42	13.80	54.29
		砂粒	59.23	92.88	73.01	14.11	19.33
		D	2.32	2.52	2.44	0.08	3.28
盐土	39	黏粒	0.00	4.54	1.58	1.12	70.89
		粉粒	1.81	70.76	28.53	17.30	60.64
		砂粒	25.07	98.19	69.89	18.22	26.07
		D	2.14	2.60	2.46	0.09	3.66

注：土壤的粒径组成(黏粒、粉粒、砂粒)的计量均为体积分数(%)。

将全部样本按照土壤粒径分布绘制三角分类图,如图2所示。根据国际制土壤质地分类三角图,66个土壤样本分为粉质壤土、壤土、砂质壤土、砂土及壤质砂土。这几类土壤的特性为砂粒含量较高,黏、粉粒含量较低,透水性较好而持水性较差。

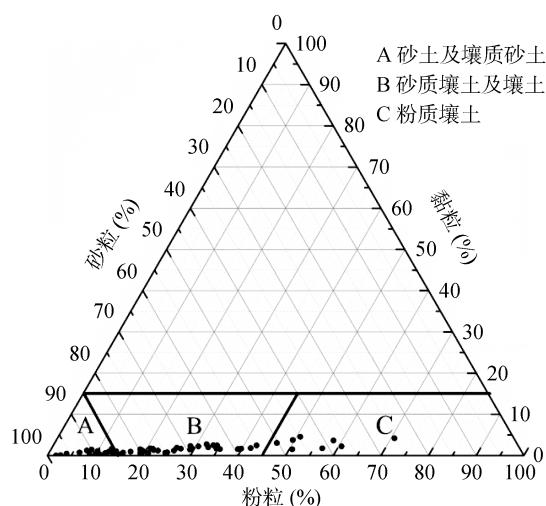


图2 盐渍化土壤质地

Fig. 2 Textures of salinized soils

由表3可知,研究区砂土及壤质砂土、砂质壤土及壤土以及粉质壤土的样本数量分别为22个、35个和9个。砂土及壤质砂土在各类盐渍化程度的土壤之中都有分布;其中砂质壤土及壤土的占比最高达到了53.85%,而粉质壤土仅出现在盐土之中,占比最小。就盐渍化程度而言,除了盐土在上述5种不同质地的土壤中均有分布以外,其他4种不同盐渍化程度的土壤仅属于砂土、壤质砂土、砂质壤土及壤土。其中粉质壤土的平均含盐量最高,达到了171.22 g/kg,平均含盐量最低的土壤质地为砂土及壤质砂土,其平均含盐量也超过了盐土的标准(47.29 g/kg)。可以看出,随着土壤颗粒逐渐变细,土壤中盐分的平均含量逐渐升高。

由表2可知,不同盐渍化程度土壤的粒径分布及分形维数存在一定差异,而现实中土壤类型分布错综复杂,判别研究区土壤颗粒的分布特征及质地均匀程度比较困难。因此,基于室内测定的PSD结果,利用ArcGIS中的地统计分析模块,采用反距离加权(inverse distance weighted, IDW)法进行空间插值,得到艾比湖湿地土壤的黏粒、粉粒、砂粒和分形维数 D 值的空间分布(图3)。

表3 不同盐渍化程度土壤的质地分类
Table 3 Statistics of soil texture types under different salinization degrees

土壤质地	样本数	盐渍化程度					平均含盐量(g/kg)
		非盐渍土	轻度盐渍土	中度盐渍土	中度盐渍土	盐土	
砂土及壤质砂土	22	4	3	3	1	11	47.29
砂质壤土及壤土	35	6	2	5	3	19	80.85
粉质壤土	9	0	0	0	0	9	171.22

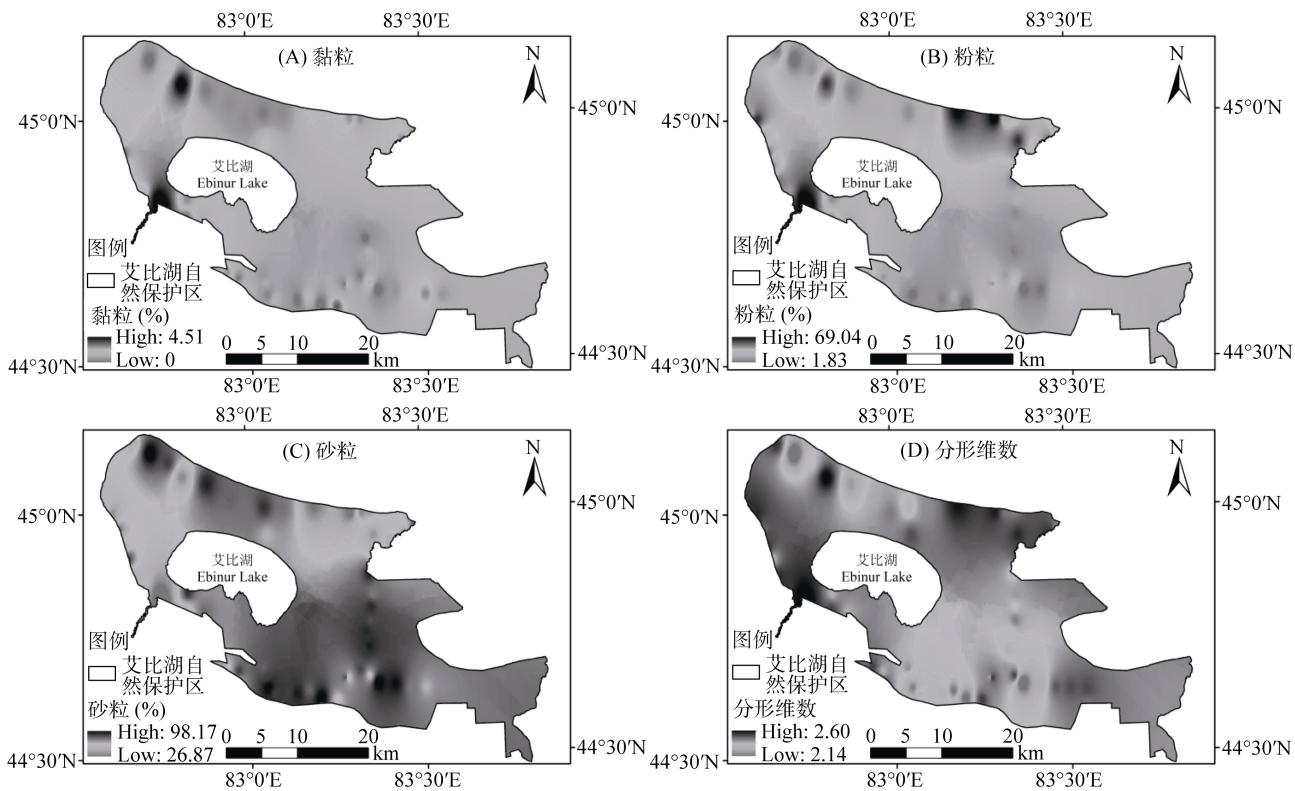


图 3 艾比湖湿地土壤的 PSD 及分形维数的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of PSDs and fractal dimensions of soils in Ebinur Lake Wetland

由图 3A 可知, 艾比湖湿地黏粒体积分数整体相对较低, 部分样点的黏粒体积分数为 0, 仅在艾比湖西北部(阿拉山口)以及艾比湖西南侧狭长地带(精河下游河岸带)存在一定的高值点, 但最高的黏粒体积分数也仅为 4.51%。粉粒含量的空间分布趋势与黏粒的类似(图 3B)。从图 3C 中可以看出, 在艾比湖西北侧和东北侧的部分区域砂粒体积分数相对较低, 就整体而言, 研究区砂粒体积分数偏高, 最值点的含量达到 98.17%, 基本上呈现出湖东南侧大于西北侧的空间分布趋势。分形维数 D 值分布则显示出与黏粒和粉粒极高的相似性, 高值区主要分布在研究区的西北侧和北部等区域(图 3D), 这与王勇辉等^[32]的研究结果一致。

2.3 土壤可蚀性因子 K 值

由公式(2)可知, 土壤可蚀性因子与土壤中黏粒、粉粒、砂粒及有机碳特征密切相关。为了建立基于研究区 USLE 的土壤侵蚀量估算数据库, 需要掌握 K 值特征。本研究通过计算获取了研究区 66 个样点的土壤可蚀性因子 K , 按照盐渍化程度进行分类并进行均值。由表 4 可知, 不同盐渍化程度土壤的土壤可蚀性因子 K 与分形维数 D 值的变化趋势一致, 即随着土壤含盐量的增加, 土壤的分形维数逐渐变大, K 值也随之逐渐增大。其中非盐渍土的 K 值最小为 0.078, 中度盐渍土适中为 0.081, 盐土的 K 值达到了 0.093。

图 4 为艾比湖湿地土壤含盐量及土壤可蚀性 K 值的空间分布图。土壤含盐量的高值区域与 K 值分布的高值区域基本一致, 主要在艾比湖湖区外围的西北、东南侧零星分布。从空间分布上也可以佐证上文的结论, 即土壤平均盐分含量越高, K 值也越大。

土壤作为一种具有分形特征的复杂系统, 分形几何常用于土壤粒径分形维数的研究。土壤粒径的分形维数可以反映土壤颗粒分布特征及质地的均匀程度, 还可以反映土壤发生、土壤肥力、土地利用覆盖类型对土壤质地的影响^[11]。对于艾比湖湿地这一典型的干旱区荒漠生态系统而言, 研究不同盐渍化程度的土壤的粒径分布及其可蚀性状况具有重要意义。本研究以艾比湖湿地获取的 66 个土壤样品为研究对象, 依据土壤含盐量的不同, 对不同盐渍化程度的土壤 PSD 和分形维数等进行分析后发现, 随着盐渍化程度的加剧, 对应土壤的 D 值也逐渐增加, 这与赵望龙等^[33]的研究结果类似。砂粒在研究区土壤中占主要地位, 并且在艾比湖东南侧广泛分布, 这可能受到南侧地形偏低以及阿拉山口大风等因素的影响^[19]。此外, 从图 3 和图 4A 中可以看出, 黏粒、粉粒、土壤含盐量等指标在艾比湖周西北侧有一些极高值分布。结合表 2 中的数据可知, 这可能是因为研究区土壤侵蚀类型以风蚀为主, 而沙质荒漠化过程发生时, 通常

伴随土壤表层细颗粒物质的损失^[26,34]。黏粒和粉粒的损失致使土壤沙化加剧,而盐渍化程度严重的区域,土壤中易溶性盐可以胶结土壤颗粒从而形成盐壳(盐结皮),能够将土壤中细粒物质固定,在一定程度上可以遏制黏粒、粉粒被风吹走,增强土壤抗风蚀能力,减缓该地区土壤荒漠化的发生与发展^[35-36]。

表4 不同盐渍化程度土壤的可蚀性因子K

Table 4 Erodibility factor K of soils under different salinization degrees

参数	非盐渍土	轻度盐渍土	中度盐渍土	重度盐渍土	盐土
K	0.078	0.079	0.081	0.083	0.093

2.4 各土壤理化指标的相关性

对研究区获得的土壤样品的土壤粒度、盐分含量和SOC含量等指标进行相关分析,结果如表5所示

示。土壤SOC含量与各种土壤粒径不相关,但与土壤中的含盐量呈显著正相关关系($r=0.599$)。土壤含盐量与黏粒($r=0.400$)和粉粒($r=0.398$)的体积分数均呈显著正相关,与砂粒体积分数显著负相关($r=-0.402$),这表明质地较细的颗粒对土壤盐分具有一定程度的吸附作用。土壤分形维数D值与黏粒、粉粒和砂粒体积分数的相关系数分别为0.751、0.855和-0.859,说明D值与黏粒、粉粒体积分数呈现出显著正相关关系,而与砂粒体积分数的关系则相反;土壤含盐量与D值的相关性也较高。土壤可蚀性因子K值与不同大小的土壤颗粒相关性均未达到显著水平,但与SOC含量显著负相关。但值得注意的是,K值与含盐量的相关性比较高($r=0.596$),在一定程度上可以说明,土壤的含盐量水平越高,K值越大,越容易被侵蚀。

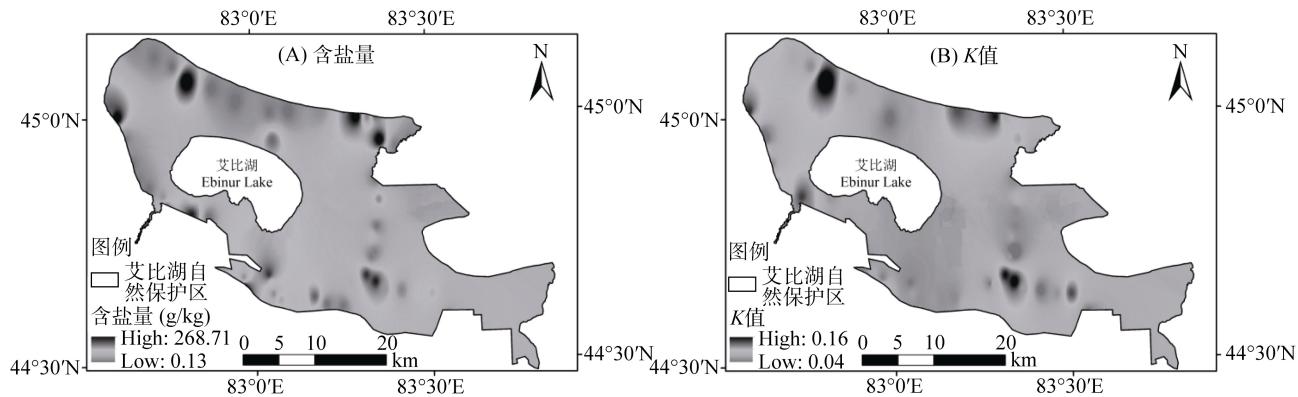


图4 艾比湖湿地土壤含盐量(A)及土壤可蚀性K值(B)的空间分布
Fig. 4 Spatial distributions of soil salinity (A) and erodibility factor K (B) in Ebinur Lake Wetland

表5 艾比湖湿地表层土壤理化指标间的相关系数($n=64$)
Table 5 Correlation coefficients among soil physicochemical properties in Ebinur Lake Wetland

	黏粒	粉粒	砂粒	SOC	含盐量	K	D
SOC	0.102	0.050	-0.054	1	0.599**	-0.577**	0.116
含盐量	0.400**	0.398**	-0.402**	0.599**	1	0.596**	0.347**
K	-0.064	0.131	-0.121	-0.577**	0.596**	1	0.043
D	0.751**	0.855**	-0.859**	0.116	0.347**	0.043	1

注: **表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关。

本研究针对土壤的含盐量对盐渍化程度进行分级,分析并计算了不同盐渍化程度土壤的K值。对于艾比湖湿地的水土保持功能和大尺度的遥感监测提供了前期数据支持。然而当前土壤可蚀性因子的获取通常是基于原始或修正后USLE进行的推算或反算。而这些模型大都属于经验型统计模型,具有一定的局限性。对于特定研究区的土壤实际状况针对性不够强,缺乏对土壤侵蚀实际状况的考虑。因此后续的研究将在探讨土壤含盐量对土壤侵蚀的

影响的同时,结合地形起伏度、植被覆盖等因素,利用土壤同位素示踪技术,进一步完善对研究区土壤侵蚀状况的研究。

3 结论

1) 研究表明,艾比湖湿地66个表层土壤样品中,盐土占比达59.09%,含盐量均值达131.59 g/kg,研究区内的盐渍化现象十分普遍,且程度较为严重。

2) 艾比湖湿地表层土壤颗粒以粉粒和砂粒为

主,随着盐渍化程度的加剧黏粒含量不断增加,砂粒含量则相反。

3) 艾比湖湿地土壤的分形维数 D 值介于 2.14~2.60, 平均值为 2.45。随着盐渍化程度加剧, 分形维数逐渐变大, K 值也随之逐渐增大, 其中盐土的 K 值最大达 0.093。

4) 艾比湖湿地土壤的可蚀性因子 K 值与含盐量的相关性较高($r=0.596^{**}$), 在一定程度上可以说, 土壤的含盐量水平越高, K 值越大, 越容易被侵蚀。

致谢: 感谢新疆联海创智信息科技有限公司地理信息工程师马轩凯在本研究图件绘制及成文过程中提供的帮助。

参考文献:

- [1] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(2): 362–369
- [2] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates[J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(4): 595–605
- [3] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993, 38(20): 1896–1899
- [4] 高雄飞, 刘元会, 郭建青, 等. 基于去趋势波动分析法的土壤含水量变化特性研究[J]. *土壤*, 2015, 47(1): 188–191
- [5] Montero E. Rényi dimensions analysis of soil particle-size distributions[J]. *Ecological Modelling*, 2005, 182(3): 305–315
- [6] Shangguan W, Dai Y, Liu B, et al. A soil particle-size distribution dataset for regional land and climate modelling in China[J]. *Geoderma*, 2012, 171–172: 85–91
- [7] 胡宏昌, 田富强, 胡和平. 新疆膜下滴灌土壤粒径分布及与水盐含量的关系[J]. *中国科学: 技术科学*, 2011, 41(8): 1035–1042
- [8] 李晓鹏, 刘建立, 张佳宝, 等. 华北冲积平原壤质潮土的土壤粒径分形空间尺度分析[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(4): 118–124
- [9] Blott S J, Pye K. Particle size scales and classification of sediment types based on particle size distributions: Review and recommended procedures[J]. *Sedimentology*, 2012, 59(7): 2071–2096
- [10] Menafoglio A, Guadagnini A, Secchi P. Stochastic simulation of soil particle - size curves in heterogeneous aquifer systems through a Bayes space approach[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(8): 5708–5726
- [11] 丁延龙, 高永, 蒙仲举, 等. 希拉穆仁荒漠草原风蚀地表颗粒粒度特征[J]. *土壤*, 2016, 48(4): 803–812
- [12] 魏茂宏, 林慧龙. 江河源区高寒草甸退化序列土壤粒径分布及其分形维数[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 679–686
- [13] Arya L M, Paris J F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45(6): 1023–1030
- [14] Gui D, Lei J, Zeng F, et al. Ordination as a tool to characterize soil particle size distribution, applied to an elevation gradient at the north slope of the Middle Kunlun Mountains[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3): 352–358
- [15] Chen X, Zhou J. Volume-based soil particle fractal relation with soil erodibility in a small watershed of purple soil[J]. *Environmental earth sciences*, 2013, 70(4): 1735–1746
- [16] 赵明月, 赵文武, 刘源鑫. 不同尺度下土壤粒径分布特征及其影响因子——以黄土丘陵沟壑区为例[J]. *生态学报*, 2015, 35(14): 4625–4632
- [17] 茹豪, 张建军, 李玉婷, 等. 黄土高原土壤粒径分形特征及其对土壤侵蚀的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 176–182
- [18] 朱成刚, 李卫红, 李大龙, 等. 伊犁河谷土壤理化性质及可蚀性特征分析[J]. *资源科学*, 2016, 38(7): 1212–1221
- [19] 李磊, 李艳红, 陈成贺日, 等. 1972~2011 年期间艾比湖面积变化研究[J]. *湿地科学*, 2014, 12(2): 263–267
- [20] 杨爱霞, 丁建丽, 李艳红, 等. 基于表观电导率与实测光谱的干旱区湿地土壤盐分监测[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(5): 1365–1373
- [21] 王勇辉, 焦黎. 艾比湖湿地土壤有机碳及储量空间分布特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(18): 5893–5901
- [22] 赵明亮, 李艳红, 李发东. 新疆艾比湖湿地土壤水盐空间变异性分析[J]. *湖泊科学*, 2016, 28(6): 1328–1337
- [23] Wu J, Shen J, Wang S, et al. Characteristics of an early Holocene climate and environment from lake sediments in Ebinur region, NW China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(2): 258–265
- [24] Ma M, Wang X, Veroustraete F, et al. Change in area of Ebinur Lake during the 1998–2005 period[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(24): 5523–5533
- [25] Wang Y, Liu Z, Yao J, et al. Effect of Climate and land use change in Ebinur Lake Basin during the past five decades on hydrology and water resources[J]. *Water Resource*, 2017, 44(2): 204–215.
- [26] 葛拥晓, 吉力力·阿不都外力, 马龙, 等. 新疆艾比湖干涸湖底不同景观单元蒸发盐分布与变化特征[J]. *湖泊科学*, 2014, 26(4): 616–624
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [28] 黄冠华, 詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用[J]. *土壤学报*, 2002, 39(4): 490–497
- [29] Williams J R. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: A case history[J]. *Philosophical Transactions Biological Sciences*, 1990, 329(1255): 421–428
- [30] 刘蕾. 新疆土壤盐分的组成和分布特征[J]. *干旱环境监测*, 2009, 23(4): 227–229
- [31] Abuduwaili J, Tang Y, Abulimiti M, et al. Spatial distribution of soil moisture, salinity and organic matter in

- Manas River watershed, Xinjiang, China[J]. Journal of Arid Land, 2012, 4(4): 441–449
- [32] 王勇辉, 何旭, 海米提·依米提, 等. 艾比湖湿地土壤粒度特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 183–187
- [33] 赵望龙, 郭中领, 王仁德, 等. 安固里淖干湖区土壤理化因子空间分布特征[J]. 湿地科学, 2016, 14(4): 553–560
- [34] 李从娟, 唐俊妍, 高培, 等. 咸水灌溉对沙漠防护林植物根系分布及风沙土演变的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 1180–1187
- [35] 张建国, 徐新文, 雷加强, 等. 极端干旱区咸水滴灌林地盐结皮对土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 34–39
- [36] 郭明明, 王文龙, 李建明, 等. 神府煤田土壤颗粒分形及降雨对径流产沙的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 983–992

Particle Size Distribution (PSD) and Erodibility of Soils Under Different Salinization Degrees in Ebinur Lake Wetland

WANG Jingzhe^{1,2}, DING Jianli^{1,2*}, WANG Fei^{1,2}, LIANG Jing^{1,2}

(1 Key Laboratory of Wisdom City and Environmental Modeling Department of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2 Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: This study is aimed to study the spatial distribution of PSDs and erodibility factor K of soils in the inland arid area as well as their relations with soil salinity. In total 66 surface soil samples were collected from the Ebinur Lake Wetland in Xinjiang Uygur Autonomous Region of China in May of 2015, PSDs, salinities and organic carbon contents of soil samples were measured, and the fractal dimension D_s and erodibility factor K were calculated. The results showed that 59.09% of soil samples was salinized with a mean salt content of 131.59 g/kg, indicating salinization is common and serious in the study area. Soil particles were mainly silts and sands, clays increased but sands decreased with the increase of salinization degree. Soil fractal dimension D was between 2.14 – 2.60 with a mean value of 2.45. In addition, with the increase of salinization degree, D and K gradually increased, the maximum K was 0.093. The correlation between K and soil salinity was extremely significant ($r = 0.596^{**}$), thus, to a certain extent, it could be concluded that the higher soil salinity, the higher K value and the more likely to be eroded.

Key words: Saline soil; Inland arid area; Fractal dimension; Soil particle size; Ebinur Lake Wetland